逻辑控制类系统可修改性探讨

王素娟*[1]　朱弘峰[1]　吴小滔[1]

（1.上海第二工业大学智能制造与控制工程学院，上海市 201209）

摘要：本文的目的是从理论和实践两方面讨论逻辑控制类软件系统的可修改性问题。本文从技术哲学的角度提出为了实现系统的可修改性，计算机科学对世界的抽象叙述应该是：“世界是由对象以及对象之间的关系所组成的。”本文说明基于这一抽象的SEA（State Event Analysis 状态事件分析）方法能够实现逻辑控制类系统的可修改性。本文以群梯建模的实例说明了SEA方法是如何通过利用并保持系统的可修改性而进行复杂逻辑控制系统建模的。本文内容有助于探索复杂制造系统建模的新的路径。

关键词：复杂系统；可修改性；技术哲学；对象技术；群梯建模

中图分类号：TP311/273　　文献标志码：A　　文章编号：

Discussion on the modifiability of logic control systems

WangSujuan[1]，*ZhuHongfeng*[1] *WuXiaotao*[1]

(1.School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: The purpose of this paper is to discuss the modifiability of logic control software systems from both theoretical and practical aspects. From the perspective of the philosophy of technology, this paper proposes that in order to realize the modifiability of the system, the abstract description of the world by computer science should be: “The world is composed of objects and the relationships between objects. ”This paper shows that the modifiability of the logic control system can be realized by the SEA (State Event Analysis) methodology which based on this abstraction. This paper uses the example of an elevator group modeling to illustrate how the SEA methodology can model the complex logic control system by utilizing and maintaining the modifiability of the system. This article helps to explore new paths for modeling complex manufacturing systems.

Keywords: Complex Systems; Modifiability; Philosophy of Technology; Object Technology; elevator group modeling

1 引言

目前逻辑控制类系统日益复杂。手机，汽车，机器人，现场生产控制系统，网络应用，电子游戏，消费系统等都在成为复杂的智能系统。它们或是完全的逻辑控制类系统或是以逻辑控制作为其框架。特别是当前复杂制造系统建模面临诸多挑战[1]，系统的可修改性问题是解决这些挑战的一个基础性问题。

本文“系统可修改性”约定为如下含义：①在系统演变的不同阶段/版本之间，对其框架结构进行改变时，应有简明、易行的规范和方式[2]；②在一个版本的框架和结构内修改时，遵循常规的编

通讯作者：王素娟　E-mail:sjwang@sspu.edu.cn

程规范就可达到版本目标[3]；③更重要的一点是，系统的可修改性具有可持续性，不因系统变得复杂而使可修改性变差或消失[4]。

若能达到这样的可修改性则可期望获得复杂系统演变的方法，并以此获得可追踪，可分析，易优化，易检测的复杂系统。例如，被广泛用于开发项目的原型法、敏捷开发方法正需要方法论指导下的、系统可修改性意义上的规范，否则方法及系统规模都难以发展[5]。

2 对建模语言的讨论

讨论逻辑控制类系统的可修改性问题，有必要从建模语言的基本结构说起。以下展开讨论。

2.1 需要严格的面向对象吗?

本文把面向对象和基于对象两种概念统称为对象技术。本文就对象技术讨论逻辑控制类系统可修改性问题。

在强调计算机软件系统可修改性的前提下，建模语言应该选择严格的面向对象的还是基于对象的语言？本文提出，应该选择基于对象的而不是严格的面向对象的语言。

现在讨论一个技术哲学命题。目前，计算机技术在对世界进行抽象时认为："世界是由对象组成的。"它对应严格的面向对象的语言。而笔者通过实践及思考认为对世界的抽象应该是："世界是由对象及对象间的关系所组成的。"它对应基于对象的语言。

软件发展需要更多的哲学思辨[6]。笔者认为：计算机建模时，对象/实体是容易识别的，但对象间关系往往是模糊的、不易确定的，是建模初期的困难所在。对象间关系受到各种约束：①外部约束。即由行业或市场或用户提出的对系统逻辑/功能/性能的要求。如电梯运行的"同向最大，顺路服务"的行业要求；芯片生产中各工艺步骤时间间隔要求；软件系统的兼容要求，等等；②系统内部逻辑的自洽要求。用 if 语句或各对象封装的逻辑修磨出来的系统如何保证系统整体逻辑不冲突不遗漏？用什么方法或方法论来保证系统逻辑的各质量指标？③计算资源的约束。计算资源以系统各时间要求和程序及数据占用的空间来衡量。可行的算法或数据都要受到这个资源的约束；④系统可修改性的要求。已建成系统其对象间关系允许系统未来可修改吗？⑤逻辑控制类系统中困难的是实时系统及逻辑要求严苛的系统，这类系统建模的关键往往在于能否揭示和解开对象间深层关系。为了构建简明而修改性良好的系统，有必要思考更一般的对象间关系和建模语言的结构。

建模的目标系统需要满足对象间关系的各种约束。对象间关系不是主观、局部定义的，而是具有客观限定性和相互制约性，在建模初期具有混沌性，无理由认为在建模之初对象间关系就能封装到繁复的对象规范中[7]。建模语言应留出认识和揭示对象间关系的可能性，使建模者可逐渐推进对对象间关系的确认。语言机制对对象的规定越多、对象中先验封装的信息越多，越可能分割，切断，搅乱系统中待揭示的约束性关系。特别是着眼于系统的可修改性时，在对象技术中更应该选择基于对象的，而不是严格的面向对象的语言。

2.2 事件驱动机制与系统可修改性

基于对象的程序是事件驱动的。下面从系统可修改性方面讨论事件驱动机制对系统程序结构的影响。

谈及系统的可修改性常涉及系统"松耦合"及"解耦"的概念。从解耦角度说，事件驱动机制把长流程型程序分散在许多事件处理过程中，可称此为第 1 种解耦；再看：严格的面向对象的语言在对象中有过多的封装和继承；而基于对象的语言正是对繁复的对象定义及规范的解耦，可称其为第 2 种解耦。为了系统的可修改性，建模时应选用自身耦合度低的语言，以避免引入系统偶然复杂度，从而利于揭示系统的本质复杂度[8]。

因此建模时选用基于对象的语言是更合适的。但事件驱动机制允许事件（序列）的发生时刻、数量及相互关系是随机的，不确定的，因此需要解决"事件序列陷阱"问题[9]。尤其当程序愈益大型、复杂，修改需求更强时，首先须解决程序的无序性，从而获得可修改性。

本文将以笔者数年来用状态事件分析（State Event Analysis 简称 SEA）方法进行的建模实践从系统可修改性方面进行一些讨论。结合单梯系统到群梯系统的升级，可以看到在单/群梯系统演化的过程中 SEA 方法使系统始终保持了可修改性。

3 SEA 方法与系统的有序性及可修改性

笔者用 SEA 方法建立单电梯模型[10]后，以此为基础形成 N 部电梯多智能体“黑板模式”的群梯系统调度模型[11]。以下从状态迁移图，定时器对象的使用，数据结构，决策算法，可视化界面技术等几个方面叙述单梯、群梯模型之间的联系与演化，以此实例观察和讨论 SEA 方法下逻辑控制类系统可修改性的实现、利用及保持。

3.1 SEA 方法中状态迁移图的使用

SEA（State Event Analysis）方法对事件驱动的系统进行状态迁移分析。它利用计算机通用可视化对象/实体（ Object/ Entity）进行系统建模，它是对系统进行分析，设计，编程，调试，修改，维护的一致性方法，并可使系统获得良好的可修改性。

虽然目标系统的状态迁移图是 SEA 方法建模的关键，但当开始系统建模时，并不一定是首先画出系统的整体状态迁移图。例如，当目标系统的某一部分可以定义为整体状态迁移图中的一个或几个状态，而对其余部分尚认识模糊时，建模可以先从定义部分状态开始，然后用状态扩展的方式完成目标系统，通过建模过程得到目标系统的整体状态迁移图。SEA 方法的单梯系统建模主要是利用扩展状态的方式实现系统及其可修改性[10]。而群梯系统建模，本文将在定时器一节介绍则是利用了另一类系统扩展的方式实现了单梯到群梯的演变。概括来说，对目标系统使用状态迁移图的时机和方式，是以帮助对系统的分析和认识为前提，这是 SEA 方法中使用状态迁移图的重要特点。

状态迁移图是对系统由外而内进行描述的工具，也是系统尚处于雏形时就可分析、认识系统的框架结构。确定状态迁移的时刻和条件是一个由粗到细、由模糊到准确的过程。因为状态迁移图有其语句层次的实现形式——select case 语句，并且该语句是各事件处理函数内统一的唯一最大框架语句，所以对系统的逐渐明晰的认识主要依靠在状态迁移图指导下的编程过程。状态迁移图、全局单一状态控制变量 state 及其 select case 语句一起共同形成 SEA 方法下由外而内，由顶向下的系统框架[12]。尽管 SEA 方法建模涉及多种建模要素，但是由于以状态视角控制了全系统的工作过程，除了 select case 语句及初始化程序之外的每一程序语句都在而且只在一个确定的状态之下，“状态”成为对系统整合、组织、使之有序的原因。状态联系起各事件处理函数的静态文本，同时也使所有处理建立了动态的，有机的状态维度的联系。状态对系统的分隔及合而为整很像庖丁解牛对牛的分解和拼合。

3.2 单梯建模的两个阶段

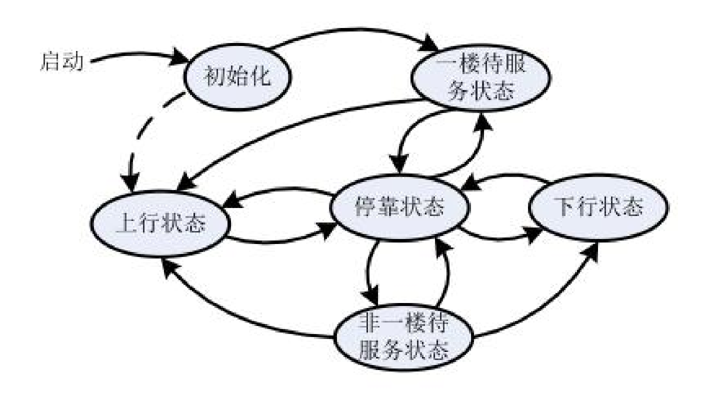


图 1　单梯状态迁移图
Fig.1 State Transition diagram of an elevator

图 1 是单电梯系统的状态迁移图。使用状态控制的单梯建模分两个阶段完成。第一个阶段先用可视化界面建立电梯在楼层间无条件往复运行，逐层停靠、开/关门的系统动态环境。特别强调的是，在这个阶段可视化界面上不放置任何命令按钮，从而避免编程采用针对一次命令按钮输入就对其进行处理的方式。第一阶段的建模任务是得到系统在除两个待服务状态外的工作状态时对已经存储的用户请求进行处理/服务的逻辑。当界面上没有按钮时是设想程序一旦运行就切入一个指定工作状态，如图 1 中的虚线表示了切入上行状态。为此在系统初始化程序中设置：1，系统将要切入的状态；2，电梯轿厢、电梯门的此刻位置；3，用户请求数组中假设已接受的请求；4，关键的变量相应值等。启动程序后电梯就开始上行运行。图 1 中未画出由初始程序也可转进停靠或下行状态的虚线，当建模需要时也可设置这种转移。这些虚线仅表示在第一阶段建模临时应用的状态转移。建模者在初始程序中设置各种用户请求组合及电梯位置和方向等，分析、编程、调试系统在上行、下行、停靠三个状态（这三个状态也称为非待服务状态或非空闲状态）中服从“同向最大，顺路服务”约束的逻辑，从而获得覆盖所有用户请求数据的调度算法[10]。当电梯对用户请求服务完毕就进入一楼或非一楼待服务状态（这两个状态也被称为待服务状态或空闲状态）。状态事件分析中引起状态迁移的事件大部分是事件驱动机制语言中定义的事件，例如引起系统从待服务状态向非待服务状态迁移的用户请求输入事件。但也有一些系统层面定义的系统行为事件，例如引起由上行/下行状态转移到停靠状态的电梯平层事件，是利用定时器中断事件实现的。SEA 方法的一个重要特点是利用可视化程序的动态、动画环境分析、厘清和完善系统逻辑。单电梯建模的第二阶段在可视化界面上放置楼层和轿厢内的命令按钮并完成对按钮输入处理的编程。该处理主要包括：1，输入有效性检查；2，启动空闲电梯；3，将有效请求存入用户请求数组等[10]。因为状态管控了每一语句，图形用户界面上的每一动画动作都编程在事件处理函数中，所以在 SEA 方法下不存在单独的图形用户界面开发问题[13]。在这个阶段完成单梯系统所有编程。如系统中任一命令按钮在任意时刻都可能进行输入。这些输入在各状态中合乎系统功能、逻辑地被处理。

3.3 定时器对象

无论是单梯系统还是群梯系统都只使用一个定时器对象。定时器与系统同时启动和退出，它始终是建模的核心对象。

先看单梯系统中定时器的工作情况。因为定时器中断程序中的最大结构是一个 state 变量的 select case 语句，所以每次定时器中断都进入某个确定的状态。定时器程序完成的任务有： ①在界面上表现可视化对象的动态行为，如电梯运行和电梯门开或关的位移变化；②由时间计数控制开关门等的时间长度；③当检测到达状态转移的位置或时刻则引起状态转移；④在系统预定的决策时刻，调用三个决策算法，使系统按决策结果行动。把单梯程序改造为群梯程序的第一步是在定时器中将原单梯的程序重复 N 次，N 为电梯数。对应在界面上可视化电梯系统增加到 N 部，单电梯的各变量都改为 N 个元素的变量数组。由于每部电梯都有自己独立的状态控制变量 state（i），i=1～N，所以群梯系统是一个异步并行系统。这一单梯系统演变为多梯系统的方式是一种非状态扩展的扩展方式。由此系统提高了复杂阶次同时仍然保持了系统的可修改性。

3.4 电梯的梯内请求

称用户进入电梯后输入的目的楼层号为梯内请求。它是电梯必须完成的自身任务。设系统约定梯内请求须是电梯运行前方（将要到达）的目的楼层号才为有效输入。作为容错性，电梯在待服务状态下输入的梯内请求也可启动电梯为该请求服务。

3.5 群梯系统用户请求的数据结构

有 N 部电梯的群梯系统的所有用户请求存储在任务表数组 button(j，i)，j=1～MAXL 中，MAXL 为电梯运行的最高楼层；N 部电梯的梯内请求占用任务表的 i=1～N 列，记为 $stop_i(j)$。该 MAXL 行 N 列各单元有两种取值，值为 0 时表示没有请求，值为 1 时表示已有该单元对应的梯内请求。 任务表

的第 N+1 列存储楼层的上行请求 button(j，N+1)=up(j)，j=1～MAXL-1；第 N+2 列存储楼层的下行请求 button(j，N+2)=down(j)，j=2～MAXL。这两列楼层请求单元有四种取值：①=0，表示没有该楼层请求；②=i，i=1～N，表示电梯 i 将服务该楼层请求；③=N+i，表示电梯 i 有梯内请求与该楼层请求匹配；④=2N+1，表示服务该楼层请求的电梯未定。第 3 种值 N+i 表示的“匹配”是指若电梯 i 有在 m 层的梯内停层请求，同时系统在 m 层有与电梯 i 同向的楼层请求，则称这两个请求相互匹配。系统在任意楼层请求及梯内请求到来时都进行匹配，若匹配成功则在任务表的楼层请求单元填入 N+i，i=1～N，是匹配电梯号。一个楼层请求有可能与多部电梯的梯内请求匹配，系统允许所有的匹配情况以覆盖方式写入该楼层请求单元。另外两种表示有任务的值 i 或 2N+1，是动态变化的，对此后文详叙。群梯系统中的每一单梯仅面对自身数据结构，它与单电梯系统的数据结构相同，即由电梯 i 的梯内请求 $stop_i(j)$ 和楼层的 up(j) 与 down(j) 三列请求所组成，但与单梯系统不同的是，群梯系统的两列楼层请求由 N 部电梯共享访问，共同服务。因此要修改原单梯调度逻辑，使 N 部电梯对随机到来的梯内外请求，既不遗漏任一请求，也尽量减少因某一电梯停靠时间延长或次数偏多而拉长电梯平均响应时间。

3.6 *群梯系统中空闲电梯的启动*

除了梯内请求可引起空闲电梯脱离空闲状态外，系统对新输入的楼层请求的响应是更主要的启动空闲电梯的契机。对一个新来的楼层请求，如果它不匹配任何梯内请求，则系统查找距离该楼层请求最近的空闲电梯，当找到电梯 i 时，就在任务表的这个楼层请求单元中填入电梯号 i，同时启动电梯 i 去服务该楼层请求；如果系统中没有空闲电梯，则以值 2N+1 存入任务表的该楼层请求单元。

3.7 *单电梯逻辑简要介绍*

描述群梯系统中的单梯工作过程仍然使用原单梯系统中的状态迁移图，即图 1。群梯系统中的每个单梯的决策算法由修改单电梯系统的三个决策算法而来。先看表 1，它是单电梯系统调用三个决策算法的简要介绍[10]。

表 1 单梯系统调用三个决策算法介绍

	算法名称	调用时刻	决策目标
1	停层决策	上行/下行中到达楼层前检测位置	电梯在该楼层是否停靠
2	优先方向决策	电梯楼层停靠、开门前	电梯本次开门的服务方向
3	运行决策	停层结束，需要确定下一状态	搜索新的服务任务；若无任务则转入待服务状态

当单梯跨楼层响应某用户请求时它依表 1 序号经历三个决策算法。其中停层决策在每一楼层前都会被调用，其他两个决策在停靠楼层期间被调用。群梯系统中的每一单梯仍以调用三个决策算法为其运行的主体逻辑。

3.8 *群梯系统的调度逻辑*

任务表中对楼层任务所填写的电梯号 i，除系统启动空闲电梯时由系统填入外，其他则完全由电梯智能体 i 以主动填入任务表“黑板”的方式进行。下面介绍每部单梯的运行逻辑。群梯中单梯 i 的某时段运行只为完成自身的梯内请求（匹配的或不匹配的）或标注为 i 的楼层请求，只此二者

之一。在任务表中标注电梯号的作用是使多部电梯分别认领不同的楼层任务从而避免重叠服务。约定：对任意电梯 i 来说只在少数必要时段任务表中仅有一个填写其电梯号 i 的单元，当电梯 i 的当前运行目标是梯内请求以及它在停靠状态的绝大部分时段，任务表中都没有任何单元值为 i。以上约定可使任意时刻一部电梯在任务表中标注的楼层请求数最低，以便让其他电梯可尽早去标注和响应原标注值为 2N+1 的楼层请求。

单梯 i 在经过每个楼层前进行停层决策时都检查有否新的目标。新的更近的目标可能是：①电梯 i 新的梯内请求；②有其他电梯将它原来标注的任务还给系统，即任务值改为 2N+1；③系统对新到来的楼层请求未启动空闲电梯时，则在该请求单元写入 2N+1。若随机发生的情况距离电梯 i 更近，则以较近的新目标替换原来较远的目标，若原较远目标是楼层任务，则其值 i 修改为 2N+1，使电梯 i 保持任务表中标注数最少。电梯 i 在楼层平层后，开门之前将调用优先方向决策。优先方向决策的目的仍如表 1 所列。在该决策中可注意的是，若电梯 i 的运行前方存在值为 2N+1 的任务，至少电梯为此也应保持运行方向不变。优先方向决策后电梯开门服务，此时任务表中不再包含值为 i 的楼层任务。电梯 i 在停层服务结束后进行运行决策。运行决策中电梯 i 搜索距离自己最近的梯内（匹配或不匹配的）请求和数值为 2N+1 的楼层请求。如果最近的是梯内请求，任务表中将仍没有值为 i 的单元，并且开始运行；如果最近的是值为 2N+1 的楼层任务，则将其值改为 i 并开始运行。如果搜索前方没有上述任务就换向搜索及服务，直到确认已无需要服务的任务，电梯 i 进入待服务状态。

本方法的群梯调度特点是，平衡各电梯的任务是由各电梯智能体的独立自主行为来动态实现，系统只在处理新的楼层信号而需启动空闲电梯时比较各空闲电梯与楼层信号的距离，除此之外系统或单梯都不进行电梯间的横向比较，系统也不进行由上而下的任务分配。

以上是一个逻辑闭合、完整的群梯系统的基础调度模型。所谓逻辑闭合，是说无论对系统还是对其中的单梯，从第一个用户请求开始到服务完最后一个用户请求，单梯将经历从待服务状态到非待服务状态，再到待服务状态的状态闭合。另外，这个系统程序对电梯数 N 可以适应从 1 到 8 的任意设置。在编程状态下若令常数 N=1，它就是单梯系统。在群梯建模初期，大部分时间在 N=1 的情况下编辑和调试群梯逻辑。然后再令 N<=8 的各值，分别运行，调试，验证，修改系统。

3.9 该群梯系统的进一步修改

这是一个适应性，可修改性较强的群梯基础模型。在这个模型基础上，将来有以下主要方向可进一步修改：

一是，系统对启动空闲电梯条件的修改。为了平衡系统中能耗与平均响应速度，可以增加一个工作电梯平均任务阈值，或称启动空闲电梯决策因子。当楼层请求到来时计算工作电梯平均任务，若其值大于所设阈值时启动空闲电梯；否则，楼层请求直接以值 2N+1 填入请求任务表中；

二是，本文限于篇幅仅表述了群梯系统由顶向下建模的要点，若为实际工程需要本文模型还可以继续细化。笔者在 plc 系统上实现了细化的本文模型[11]，也说明了本文方法的优点和可行性；

三是，实现系统高峰调度功能。实际群梯系统常存在各种特定高峰调度要求，如上班、下班高峰服务（UPS/DPS）等等。总的来说为满足特定要求，SEA 方法可以在三个层次进行修改：①程序层次的，也就是在图 1 的状态迁移图中不增加新的状态，而是添加新的事件线，在发生更多事件（条件）下状态之间发生更多的状态迁移；②修改图 1 的状态迁移图，使部分单梯添加特定高峰状态；③视上述群梯基础模型为群梯系统的一个常规状态。在前述模型之上增加一个顶层状态迁移图及其顶层状态控制变量 top_state，这时系统包含可与常规状态相互转移的高峰状态。这里可注意的是，即使状态又向上增添了一层，但顶层的 top _state 控制的各状态仍对系统从顶层分割到语句层次，即状态仍保持了可扩展的特性。上述三种修改方案有可能需要综合、同时使用。实际工程中一般用定时方式发生高峰状态的切换。因为高峰功能和要求在具体系统中是多变的，所以 SEA 方法和本模型提供上述修改的可能性。而由本文提供一个具备多种修改可能性的基础模型无论是理论上还是工程上都是十分必要和有意义的。

4 结束语

SEA 方法建模能够实现和保持系统可修改性的原因是 SEA 方法总是可以实现其目标系统的框架价值[2]。无论是简单系统、雏形系统或是本文这样的群梯复杂系统，SEA 方法是同时实现系统的行为价值[2]和框架价值的。现在现实世界的事物越来越多地转化为基于计算机的系统，揭示这类事物的本质复杂度[8]是对象技术的一个必然使命。对象技术不是过时了，或技术问题都解决了[14]，而是处在完成其使命，同时发展其自身理论、技术、应用、经验的时间上。应该承认对象技术在揭示逻辑控制类系统本质复杂度方面具有独特性，现在应进一步发展其规范和应用。同时应该在本文所议技术哲学命题的基础上发展中国自己的基于对象技术的建模(元模型)语言[15]及其理论。

参考文献：

[1] 于青云,赵慧,许佳,等. 复杂制造系统建模与优化研究现状及展望[J]. 信息与控制, 2023, 52(1): 1-17.

[2] [美]Robert C. Martin. 架构整洁之道[M].孙宇聪译.北京:电子工业出版社,2018 年 9 月:3-11.

[3] [美]Robert C. Martin. 代码整洁之道[M].韩磊译.北京:人民邮电出版社,2020 年 2 月:1-13.

[4] [美]马丁·福勒.重构 改善既有代码的设计(第 2 版)[M].熊节译.北京:人民邮电出版社, 2019 年 4 月:45-68.

[5] [美]罗伯特 C.马丁.敏捷开发[M].简方达译.北京:清华大学出版社,2021 年 8 月:1-21.

[6] [美]约翰.奥斯特豪特.软件设计的哲学(第 2 版)[M].茹炳晟译.北京:人民邮电出版社,2024 年 11 月:191-198.

[7] [加]Ilya Suzdalnitski.面向对象的编程:一场万亿美元级的灾难[EB/OL].河南:云头条,2019 年 8 月 23 日. https://medium.com/better-programming/object-oriented-programming-the-trillion-dollar-disaster-92a4b666c7c7

[8] [美]小弗雷德里克 P.布鲁克斯.人月神话(纪念典藏版)[M].UMLChina 译.北京:清华大学出版社,2023 年 6 月:1-7.

[9] [以]Natan Silnitsky.事件驱动架构要避开的 5 个陷阱[EB/OL].明知山译.辽宁:InfoQ, 2023 年 01 月 20 日. https://natansil.medium.com/event-driven-architecture-5-pitfalls-to-avoid-b3ebf885bdb1

[10] 吴小滔,王素娟,唐国春.逻辑控制系统的一种建模方法[J]. 计算机仿真,2006, 23(08):49-54.

[11] 王素娟,吴小滔.电梯群控系统调度算法研究[J].现代电子技术,2022,45(11):104-107.

[12] 吴小滔,陈冠玲,杨美华,等.逻辑控制类系统建模的实现[J].计算机工程, 2005,31(21):195-197,200.

[13] 刘贵聪,周淦,杜超,等.面向航天任务的可视化应用拓扑建模方法研究 [J] .网络安全与数据治理,2022 , 41 (2) : 99-105 .

[14] [美]Rhea Moutafis.面向对象编程已死?[EB/OL].Sambodhi 译.北京:AI 前线,2020 年 10 月 12 日. https://towardsdatascience.com/object-oriented-programming-is-dead-wait-really-db1f1f05cc44

[15] 吴小滔,唐国春,等.复杂系统计算机建模初探[J].系统仿真学报,2004,16(8):1779-1784.

(通讯作者: 王素娟 E-mail:sjwang@sspu.edu.cn)

作者贡献声明一：

王素娟：设计研究方案， 研究方案实施；
朱弘峰：数据采集、分析；
王素娟、朱弘峰：论文起草；
吴小滔：提出研究思路，设计研究方案，论文最终版本修订。